

## ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ЦЕМЕНТНОМ КАМНЕ И БЕТОНЕ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ С УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМ МИКРОКРЕМНЕЗЕМОМ

Гуриненко Н. С., Батяновский Э. И.

**Введение.** В технологии высокопрочного, особо плотного бетона используют дополнительные компоненты, один из которых – микрокремнезем, представляющий собой  $\text{SiO}_2$  в активной (аморфной) форме, вводимый в количестве (10 ... 30)% от массы цемента [1 - 3].

Традиционный микрокремнезем поставляется и используется в неуплотненном состоянии (МК) с насыпной плотностью 150 ... 200  $\text{кг/м}^3$ , в уплотненном состоянии (МКУ) с насыпной плотностью порядка 500 ... 600  $\text{кг/м}^3$  и в виде пасты - водной суспензии концентрацией (50 ... 60)% [4 - 7]. Введение микрокремнезема требует дополнительного оборудования БСУ, и кроме этого суспензии подвержены осаждению и расслоению при хранении, замерзанию при отрицательных температурах. Те же проблемы сопутствуют использованию композиционного материала - «Модификатор бетона марки МБ-01» и его разновидностей, компонентом которых является микрокремнезем. Данный продукт представляет собой порошок насыпной плотностью 750 ... 800  $\text{кг/м}^3$ , состоящий из гранул размером до 100 мкм [8], вводимый в бетон в количестве (8 ... 15) % от массы цемента.

Решая задачу ускорения твердения и повышения плотности и прочности бетона нами предложена комплексная добавка ускоряюще-уплотняющего структуру действия [9]. Однако для высокопрочного бетона ее эффективности не достаточно. В развитие исследований с высокопрочным бетоном установлена возможность обеспечения его прочности на сжатие на уровне  $f_{cm,28} \geq 100$  МПа при замене традиционного микрокремнезема (МК; дозировка 10% от МЦ) на ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) в дозировке 1,0 % от МЦ при равной прочности [10, 11]. На этом основании разработан состав полифункциональной добавки, включающей гиперпластификатор, УДМК, ускоряющий и уплотняющий структуру бетона компоненты, с целью ее использования в конструкционном бетоне традиционных классов и высокопрочном. В этой связи появилась необходимость исследовать закономерности влияния такой добавки на процессы гидратации, твердения и свойства цементного камня и конструкционного бетона.

**Характеристики материалов для исследований.** В качестве *вяжущего вещества* – портландцемент марки ПЦ 500 по ГОСТ 10178, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБ EN 197-1 ( $K_{нт} = 0,25$ , со сроками схватывания: начало – 2 ч 10 мин, конец – 3 ч 50 мин). *Крупный заполнитель* для бетона – щебень гранитный (Микашевичи) кубовидный фракций: 2 ... 4; 4 ... 6 мм, прочностью (по дробимости)  $\geq 110$  МПа, насыпной плотностью:  $s_0 \sim 1380$   $\text{кг/м}^3$  и 2410  $\text{кг/м}^3$ ; плотностью зерен:  $s_3 \sim 2700$   $\text{кг/м}^3$ . *Мелкий заполнитель* – природный (мытый) песок; с модулем крупности:  $M_k \sim 2,6 \dots 2,8$  доли ед.; насыпной плотностью:  $s_0 = 1550$   $\text{кг/м}^3$ , плотностью зерен  $s_3 \sim 2650$   $\text{кг/м}^3$ ; соответствующий требованиям ГОСТ 8736–93. *Вода* для затворения и последующего твердения бетона соответствующий требованиям СТБ 1114–98 и ГОСТ 23732–2011.

*Ускоритель твердения* – сульфат натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ; СН) кристаллизационный, по ГОСТ 21458-75 и *уплотняющая структура* добавка – сульфат алюминия ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ; СА) по ГОСТ 12966–85.

В качестве *пластификатора* использовали «Стахемент 2000» (в тексте обозначено Ст) - пластифицирующую добавку I группы согласно СТБ 1112-98 (суперпластификатор с повышенным водоредуцирующим эффектом) в виде водного раствора 35%-ой концентрации.

*Микрокремнезем* – в соответствии с требованиями СТБ EN 197-1 с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; потери при прокаливании не более 4,0 %; удельная поверхность (по методу БЭТ)  $\sim 15,0$   $\text{м}^2/\text{г}$  (при использовании приборов типа «ПСХ»  $S_{уд}^{МК} \sim 3,0$   $\text{м}^2/\text{г}$  или 30 000  $\text{см}^2/\text{г}$ ); гранулометрический состав, определенный с помощью электронного анализатора «ANALYSETTE 22 NanoTec», представлен на рисунке 1.

Interpolation Values... C:\Program Files\la22 32\fritsch\HIMNT_1.FPS						
0.050-	1.000µm=	0.39%	1.000-	2.000µm=	0.28%	
3.000-	4.000µm=	0.03%	4.000-	5.000µm=	0.30%	
10.000-	20.000µm=	0.11%	20.000-	50.000µm=	5.86%	
100.000-	200.000µm=	16.83%				
				2.000-	3.000µm=	0.09%
				5.000-	10.000µm=	2.66%
				50.000-	100.000µm=	31.47%

Interpolation Values... C:\Program Files\la22 32\fritsch\10_90.FPV					
10.0 % <=	51.138 µm	20.0 % <=	69.995 µm	30.0 % <=	83.355 µm
40.0 % <=	98.113 µm	50.0 % <=	119.314 µm	65.0 % <=	246.879 µm
70.0 % <=	267.991 µm	80.0 % <=	305.494 µm	90.0 % <=	353.545 µm
10.2 % <=	51.721 µm	20.4 % <=	70.613 µm		

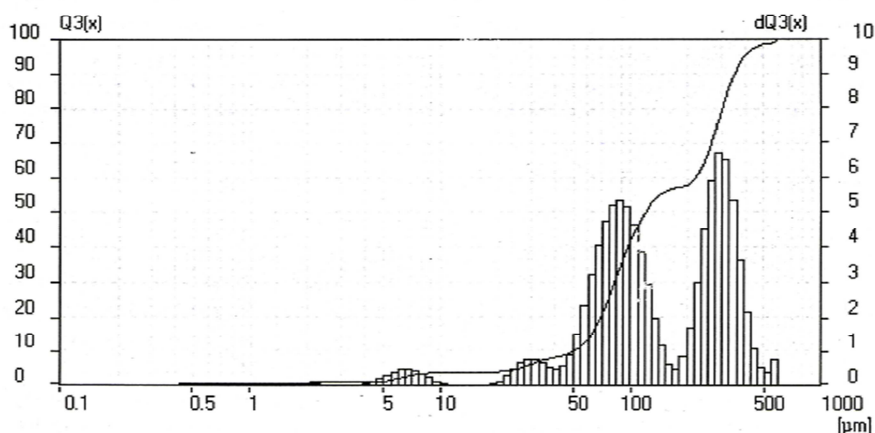


Рисунок 1 – Гранулометрический состав порошка микрокремнезема (МК)

Ультрадисперсный микрокремнезем, соответствующий ТУ 2168-002-14344269-09 «Ковелос» (диоксид кремния осажденный) с характеристикой гранулометрического состава, приведенного на рисунке 2.

Interpolation Values... C:\Program Files\la22 32\fritsch\HIMNT_1.FPS						
0.050-	1.000µm=	0.92%	1.000-	2.000µm=	3.73%	
3.000-	4.000µm=	12.20%	4.000-	5.000µm=	12.58%	
10.000-	20.000µm=	13.79%	20.000-	50.000µm=	0.00%	
100.000-	200.000µm=	0.00%				
				2.000-	3.000µm=	9.63%
				5.000-	10.000µm=	47.16%
				50.000-	100.000µm=	0.00%

Interpolation Values... C:\Program Files\la22 32\fritsch\10_90.FPV					
10.0 % <=	2.602 µm	20.0 % <=	3.476 µm	30.0 % <=	4.287 µm
40.0 % <=	5.075 µm	50.0 % <=	5.922 µm	65.0 % <=	7.348 µm
70.0 % <=	7.883 µm	80.0 % <=	9.087 µm	90.0 % <=	10.715 µm
10.2 % <=	2.621 µm	20.4 % <=	3.512 µm		

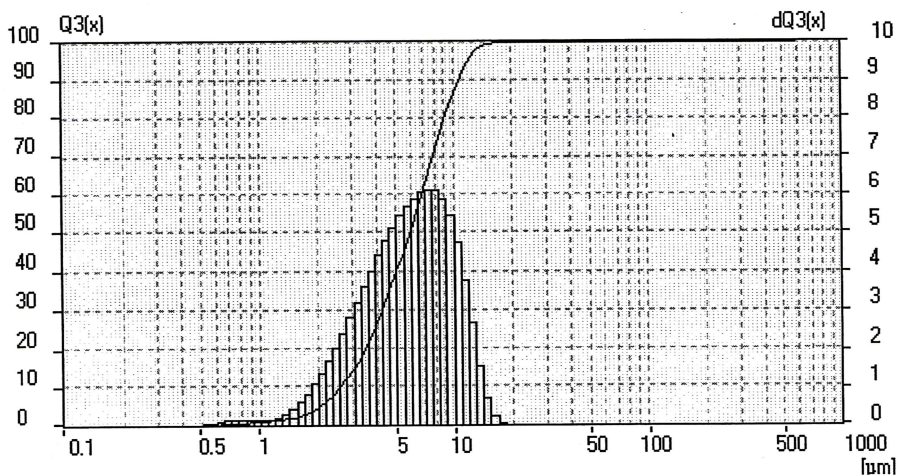


Рисунок 2 – гранулометрический состав УДМК

**Оценка изменений щелочности.** Одним из проблемных вопросов применения микрокремнезема в железобетоне является его допустимая дозировка с позиции долговременной защиты стальной арматуры. С учетом связывания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в нерастворимые соединения и понижение рН-фактора менее критической величины:  $\text{pH} \geq 11,8$  ед. безопасной считается дозировка МК в количестве 10 ... 11 % от массы цемента.

Для оценки этой ситуации при использовании УДМК провели соответствующие исследования (таблица 1). Пробы цементного камня готовили в соответствии с СТБ 1168-99 п. 6.15.2. В мерные колбы вместимостью 50 мл засыпали 1 г пробы, заливали дистиллированной водой (20 мл) и закрывали резиновыми пробками. Перед каждым измерением рН полученный раствор перемешивали; измерения произвели с помощью портативного рН-метра «Н183141».

Таблица 1 – pH водных вытяжек образцов цементного камня

Время	"Без добавок"	0,5%Ст	0,5%Ст+10%МК	0,5%Ст+1%УДМК	0,5%Ст+1,5%УДМК	0,5%Ст+1%УДМК+0,5%СН+0,25%СА
1 мин	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3
2 мин	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3
10 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
30 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
60 мин	12,55	12,55	12,44	12,41	12,40	12,41
2 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
10 сут.	12,73	12,73	12,71	12,65	12,65	12,50
20 сут.	12,70	12,71	12,69	12,65	12,63	12,55
30 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50
60 сут.	12,70	12,70	12,67	12,63	12,61	12,50

Из экспериментальных данных следует, что исследуемое вещество ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) в целом не критически снижает pH-фактор и, соответственно, при использовании УДМК в железобетоне (как индивидуально, так и в составе комплексной добавки) не потребуются дополнительной защиты арматуры.

**Кинетика тепловыделения цемента.** Тепловыделение (экзотермия) цемента – фактор, влияющий на кинетику твердения цементного бетона и играющий существенную роль в реализации энергосберегающих технологий в производстве сборного железобетона и в монолитном строительстве. Для сравнительной оценки влияния МК и УДМК, а также разрабатываемой полифункциональной добавки на тепловыделение цемента при твердении цементного теста использовали методику, описанную в источниках [13, 14]. Готовили цементное тесто нормальной густоты, которое укладывали (400 г) в пластмассовые стаканчики (диаметром 70 мм и высотой 80 мм) и уплотняли постукиванием. На поверхность теста устанавливали запрограммированные датчики температуры «DS 1921», стаканчики закрывали крышками и помещали в гнезда термокассеты, выполненной из экструдированного пенопласта. Изменение температуры фиксировали в течение полутора суток (рисунок 3).

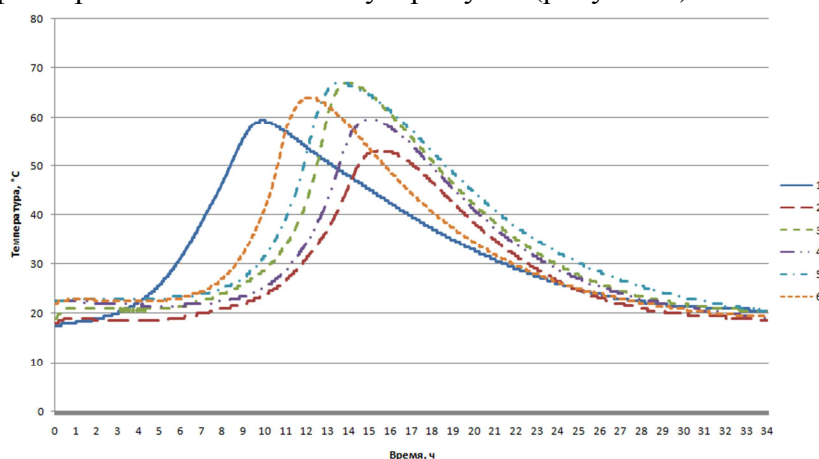


Рисунок 3 – Кинетика изменения температуры цементного теста, где 1-"Без добавок", 2-0,5%Ст, 3-0,5%Ст+ 10%МК, 4-0,5%Ст+1%УДМК, 5-0,5%Ст+1,5%УДМК, 6-0,5%Ст+1%УДМК+ 0,5%СН+ 0,25%СА

Из результатов экспериментов, следует, что введение комплексных добавок, которые содержат пластификатор (особенно - только пластификатор, график № 2) сдерживает гидратационный процесс, а с ним и тепловыделение цемента. Это отражается в «запаздывании» эффекта тепловыделения в сравнении с графиком № 1 (цемент без добавок). При этом с течением

нием времени проявляется эффект ускорения гидратации цемента под влиянием микрокремнезема (МК) и УДМК (№ 3 и № 5), а также под влиянием комплексной полифункциональной добавки, содержащей УДМК и вещества сульфата натрия и сульфата алюминия (№ 6).

**Степень гидратации вяжущего.** Степень гидратации вяжущего в бетоне (при прочих равных условиях) составляет основу его плотности и прочности, а на этом основании – всей совокупности его качественных характеристик. Было важно оценить в сопоставлении влияние на степень гидратации цемента добавок микрокремнезема УДМК, а также разрабатываемой полифункциональной добавки.

Степень гидратации вяжущего определили по количеству химически связанной воды (ХСВ) из зависимости:  $\alpha = w_{xc} / w_0 \cdot 100, \%$ , где  $w_0$  – количество воды, которое связывается при полной гидратации вяжущего и которое принято равным 22,7 % или приблизительно 23 % от массы вяжущего [15]. В таблице 2 приведены результаты испытаний проб образцов (в возрасте 28 суток) цементного камня «без добавок» и содержащего исследуемые добавки.

Результаты экспериментов однозначно показывают, что к 28 суткам твердения цементного камня добавки повышают степень гидратации цемента. Для монодобавки пластификатора этот эффект не значителен, и связан с ее способностью (за счет активности молекул ПАВ) усиливать пептизацию (деагрегацию, распадение) флокул цемента, т.е. за счет увеличения площади контакта и последующей реакции вяжущего с водой.

Таблица 2 – Результаты определения степени гидратации цемента

Номер и состав пробы	$m_{105}$	$m_{прок}$ (4 часа - 700°С)	$w_{xc}$	$w_0$	$\beta, \%$
1. Без добавки	7,71	6,9	0,1174	0,227	51,71
2. 0,5% СТ	6,22	5,55	0,1207		53,18
3. 0,5% СТ +10% МК	6,22	5,43	0,1455		64,09
4. 0,5% СТ +1% УДМК	8,22	7,15	0,1490		65,62
5. 0,5% СТ +1,5% УДМК	8,72	7,53	0,1580		69,62
6. 0,5% СТ +1% УДМК + +0,5% СН+0,25% СА	8,75	7,53	0,1620		71,37

Более существенен рост ХСВ для состава с добавкой аморфного  $SiO_2$ , т.к. связывание им  $Ca(OH)_2$  ускоряет ход реакций гидратации  $C_3S$  и  $C_2S$  с понижением щелочности реагирующей системы «цемент–вода».

Наиболее значим (с 51,71 % до 71,37 %) рост степени гидратации цемента с комплексной полифункциональной добавкой. В этом случае эффективность аморфного  $SiO_2$  дополняется действием добавок–электролитов ( $Na_2SO_4$  и  $Al_2(SO_4)_3$ ), которые проявляют комплексное действие [16], включающее повышение растворимости клинкерных минералов, пептизацию цементных флокул и образование дополнительных соединений с участием вещества этих добавок. Этот совокупный эффект подтвержден установленным экспериментально ростом прочности на сжатие образцов цементного камня с полифункциональной добавкой на (25 ... 30)%.

**Результаты детермического анализа.** Рост прочности цементного камня, увеличение количества ХСВ цементом отражают глубинные изменения в его структуре под влиянием вещества вводимых добавок.

Возможные фазово-структурные изменения затвердевшего цементного камня исследовали в сравнительном варианте: испытывали пробы на «чистом» цементе, сопоставляя с данными проб, содержащих добавки (по таблице 2).

Исследования термического воздействия на пробы материала осуществили с помощью прибора – термогравиметрического анализатора TGA/DSC1-1/1600 HF (METTLER TOLEDO). Результаты приведены на рисунках 4 и 5 (соответственно: для «чистого» цемента и с полифункциональной добавкой).

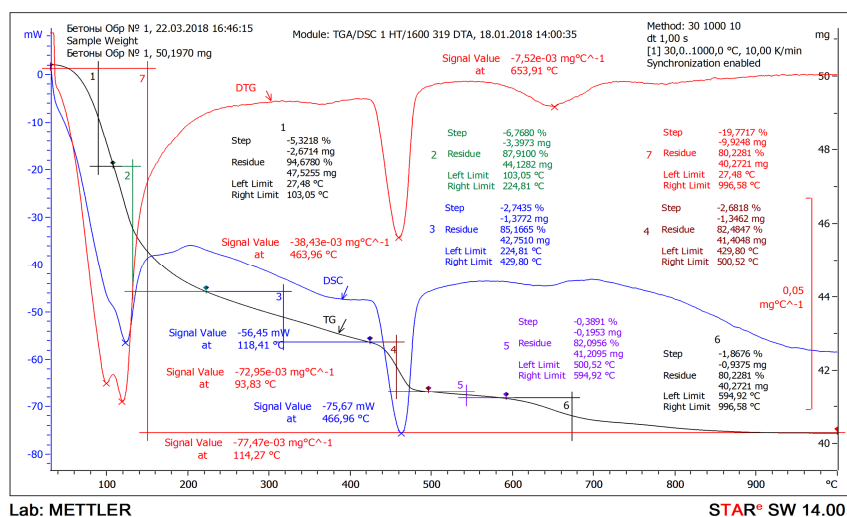


Рисунок 4 – Дериватограмма пробы «чистого» цементного камня, не содержащего добавок

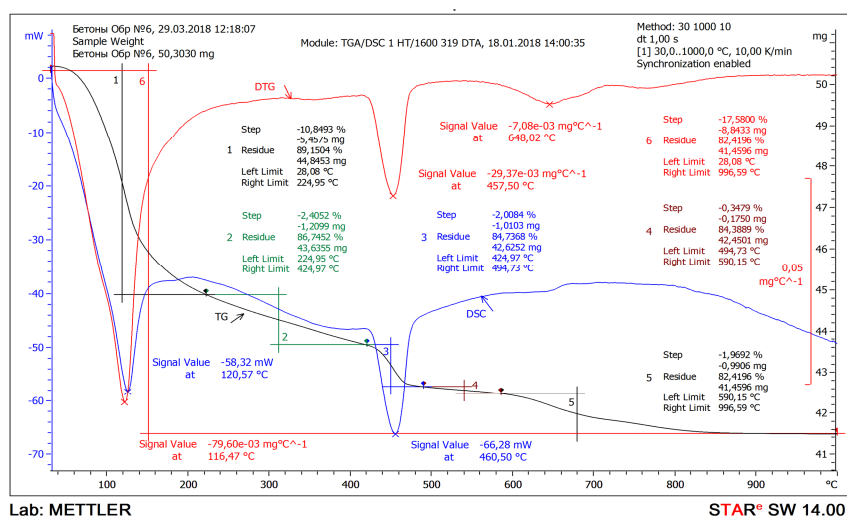


Рисунок 5 – Дериватограмма пробы цементного камня, содержащего 0,5% Ст+1% УДМК+0,5% СН+ 0,25% СА от массы цемента

Из анализа полученных данных следует, что введение аморфного кремнезема  $\text{SiO}_2$  существенно снижает количество разлагающегося под действием температуры  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и способствует росту количества кристаллогидратных новообразований силикатной группы. Эти данные согласуются с результатами определения количества химически связанной воды цементом аналогичных проб и теоретическими воззрениями на роль аморфного кремнезема в процессах взаимодействия клинкерного цемента с водой.

Анализ графиков «DSC» (скорость снижения массы) и «DTG» (здесь - отражение изменений энтальпии), приведенных на рисунках 4 («чистый» цементный камень) и 5 (цементный камень с полифункциональной добавкой), показывает следующее.

Во-первых, разница в зоне температуры  $\sim 110^\circ\text{C}$ , отражающей потери «свободной» (находящейся в поровом пространстве проб цементного камня) воды. Снижение показателя проб «чистого» камня составляет  $\sim 70 \text{ mW}$ , а проб с добавкой  $\sim 60 \text{ mW}$ , т.е. существенно меньше. Это свидетельствует об уменьшении объема пор в пробах цементного камня с добавкой, т.е. о росте плотности его микроструктуры.

Во-вторых, изменения эндотермического «пика» в зоне температур  $\sim (420..480)^\circ\text{C}$ , отражающего разложение гидроксида кальция ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Его площадь на дериватограмме проб с добавкой значительно меньше, чем для проб «чистого» цементного камня. Это свидетельствует о развитии реакции  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с аморфным  $\text{SiO}_2$  с уменьшением количества гидроксида кальция.

В-третьих, увеличивается площадь эндотермического «пика» в зоне температур ~ (550...750) °С, отражающего разложение кристаллогидратных новообразований клинкерных минералов цемента. При этом в пробах с добавкой снижается уровень минимальной температуры их разложения: с 653,91 °С (проба без добавок) до 648,02 °С для пробы с добавкой. Эти данные свидетельствуют об образовании под влиянием вещества добавки низкоосновных кристаллогидратов силикатов кальция, которые имеют меньшие размеры и способствуют формированию более плотной и прочной структуры цементного камня.

В целом результаты дериватографического анализа согласуются с данными о большем количестве ХСВ цементом и о росте прочности цементного камня под влиянием веществ, составляющих разрабатываемую полифункциональную добавку.

**Особенности приготовления добавки и введения ее в бетон.** Относительно приготовления добавки наиболее рационален вариант механического смешивания входящих в ее состав компонентов в сухом порошкообразном виде.

Возможен (экспериментально проверен) вариант двухкомпонентной добавки, включающей приготовление сухой смеси УДМК, сульфата натрия и сульфата алюминия при отдельном введении в бетон на стадии приготовления расчетного количества раствора пластификатора.

Отработан экспериментально вариант приготовления раствора–дисперсии (т.к. вещество УДМК не растворимо в воде, в отличие от остальных компонентов) перед введением добавки в бетон. С этой целью выполнены исследования по оценке седиментационной устойчивости дисперсии УДМК в воде при простом механическом смешивании и с обработкой ее при помощи ультразвука (т.е. эффекта кавитации)

Для установления эффективности обработки на гомогенизаторе «Hielscher UP200Ht», обрабатывая пробы в течение 5 минут до температуры разогрева (60 ... 65)°С (максимальный эффект кавитации) были приготовлены водные дисперсии УДМК и УДМК с пластификатором.

Затем часть дисперсий поместили в стеклянные емкости для наблюдения за седиментационной устойчивостью; вторую часть использовали при изготовлении образцов цементного камня для оценки его прочности (таблица 4).

Выявлено, что седиментационная устойчивость водной дисперсии УДМК существенно повышается при обработке ее ультразвуком на стадии приготовления. Реализуемое в этом случае кавитационное воздействие на готовящуюся дисперсию способствует дополнительной дезагрегации конгломератов из частиц УДМК, что повышает ее устойчивость. Однако дисперсия, приготовленная только на воде сохраняет однородность и устойчивость не более суток, через сутки происходит ее загустевание и «стеклование». В случае обработки ультразвуком дисперсии с введением пластификатора эффекта «стеклования» не наблюдается и, по нашим данным, дисперсия сохраняет однородность не менее 60 суток.

Оценка седиментационной устойчивости водной дисперсии УДМК, приготовленной механическим смешиванием, показала, что она без признаков расслоения хранится до 45 минут, а в случае приготовления раствора–дисперсии полифункциональной добавки – до 60 минут, чем обеспечивает возможность ее гарантированного введения в бетон в расчетном количестве с водой затворения.

Таблица 4 – Прочность на сжатие образцов цементного камня в зависимости от обработки дисперсии УДМК ультразвуком

Номер состава, вид добавки и количество в % от МЦ	В/Ц	<i>f<sub>сж.цк</sub></i> , МПа	<i>f<sub>сж.цк</sub></i> , МПа	<i>f<sub>сж.цк</sub></i> , МПа	<i>f<sub>сж.цк</sub></i> , МПа	<i>f<sub>сж.цк</sub></i> , МПа
		1 сутки	3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1. 1% УДМК	0,26	32,7	39,2	41,7	72,7	81,0
2. 1% УДМК (ультразвук)	0,255	32,6	39,6	41,9	73,7	82,5
3. 0,5% Ст +1% УДМК	0,20	30,2	44,4	64,8	82,6	93,2
4. 0,5% Ст +1% УДМК (ультразвук)	0,20	30,8	44,9	67,4	84,2	94,7

Из данных таблицы 4 (серии из 6 образцов (20\*20\*20 мм), нормально-влажностные условия твердения) следует, что эффективность в цементном камне (экспериментально выявлено, что и в бетоне) введенного в его состав УДМК практически не зависит от наличия кавитационной обработки ультразвуком. Это свидетельствует о том, что вещество УДМК вполне качественно распределяется в объеме воды при простом механическом смешивании и этот прием приготовления раствора–дисперсии разрабатываемой добавки достаточен для использования при приготовлении бетона с ней.

**Кинетика твердения и прочность высокопрочного бетона с добавками.** Основной задачей, которая была решена в экспериментальных исследованиях с высокопрочным бетоном, явилась оценка эффективности замены микрокремнезема в его составе на ультрадисперсный микрокремнезем, при дозировке последнего в 10 раз меньше, но без снижения прочности бетона. Реализация такого решения позволяет существенно упростить технологию приготовления высокопрочного бетона, благодаря приему введения УДМК в виде седиментационно устойчивой дисперсии с водой затворения, либо в виде водного «раствора–суспензии» комплексной полифункциональной добавки.

Для исследований, результаты которых приведены в таблице 5, использовали составы, обоснованные в источниках [2, 3], как обеспечивающий прочность бетона на сжатие в проектном возрасте:  $f_{cm,28} \sim 100...110$  МПа, при использовании «традиционного» микрокремнезема (МК–85 или УМК–85) в дозировке 10% от МЦ и пластификатора I-ой группы – «гиперпластификатора» Ст2000 (в виде раствора 35% концентрации).

Образцы во всех случаях распалубливали через 21...22 часа от момента изготовления; одни серии (по 3 образца) испытывали в возрасте 24 ч и через указанные в таблице 5 периоды (1, 3, 7, 14, 28 и 90 суток) твердения в нормально - влажностных условиях; другие подвергали тепловой обработке, включавшей медленный нагрев бетона в формах до температуры ~ (30...35) °С (при температуре среды в пропарочном бачке (40...45) °С) за 2...2,5 ч и последующее термостатирование – выдерживание без подвода тепла в тепловом агрегате 21...22 ч от момента изготовления до распалубки, при первом испытании через 24 ч и последующим «дозревании» образцов до испытаний в нормально - влажностных условиях.

Таблица 5 – Прочность на сжатие образцов высокопрочного бетона в зависимости от состава и условий

Вид добавки и количество в % от МЦ	(В/Ц) <sub>б</sub> ; марка по подвижности	Условия изготовления	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте				
			1 сут.	3 сут.	7 сут.	28 сут.	90 сут.
10%МК+0,5%Ст	0,223; П1	НВУ	49,5	76,2	82,2	105,2	107,6
1%УДМК+0,5%Ст	0,263; П1		47,7	76,1	82,1	101,7	105,0
10%МК+0,5%Ст	0,258; П2		41,7	77,2	87,2	107,0	108,7
1%УДМК+0,5%Ст	0,282; П2		44,4	81,7	93,4	107,9	109,7
10%МК+0,5%Ст	0,258; П2	нагрев среды до $t = 45^{\circ}\text{C}$	49,2	77,8	83,1	100,0	102,4
1%УДМК+0,5%Ст	0,282; П2		50,3	79,2	84,7	101,9	103,4

Результаты экспериментов подтверждают возможность замены традиционного микрокремнезема, в дозировке 10% от массы цемента, на ультрадисперсный микрокремнезем, в дозировке 1% от МЦ, без снижения темпа твердения и уровня прочности высокопрочного бетона при твердении в нормально–влажностных условиях и с низкотемпературным нагревом во все сроки в пе-

риод до 90 суток. С учетом того обстоятельства, что УДМК может быть введен в бетонную смесь на стадии ее приготовления в виде дисперсионной комплексной полифункциональной добавки, такая замена обеспечивает существенное упрощение технологии приготовления бетона, по сравнению с существующей технологией с использованием традиционного микрокремнезема. Так же выявлена возможность использования УДМК в составе комплексной полифункциональной добавки в литых бетонных смесях (марки П5), с обеспечением высокого темпа роста прочности в начальные сроки твердения и ее уровня к проектному возрасту. Исследования в этом направлении продолжаются и будут представлены в дальнейшем.

Обобщение результатов экспериментальных исследований, приведенных в настоящей статье, позволяют сделать следующие выводы.

**Заключение.** Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о достаточно высокой эффективности и перспективности предлагаемой полифункциональной добавки в бетон, содержащей в составе ультрадисперсный микрокремнезем.

Снижение рН-фактора с введением УДМК в цементный бетон на 0,1 ... 0,2 единицы (с 12,70 до 12,50 за 20 ... 60 суток твердения) не является критическим с позиций защиты им стальной арматуры от коррозии. Особенно с учетом того обстоятельства, что под влиянием предлагаемой добавки возрастает прочность, плотность и непроницаемость бетона.

Возрастающее в присутствии аморфного  $\text{SiO}_2$  тепловыделение гидратирующегося цемента и степень гидратации вяжущего согласуется с выводом о росте плотности и непроницаемости цементного бетона с проверенными добавками и, в особенной мере, с полифункциональной, комплексной, содержащей УДМК в сочетании с ускоряющей ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) твердение и уплотняющей структуру ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) цементного камня и бетона.

Данные дериватографического анализа подтверждают снижение под влиянием аморфного  $\text{SiO}_2$  в продуктах гидратации цемента количества  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  при росте содержания кристаллогидратных новообразований от клинкерных минералов цемента.

Седиментационная устойчивость водной дисперсии УДМК в пределах 45 ... 60 минут при механическом смешивании и более 24 ч при обработке ультразвуком обеспечивает необходимые условия для введения с водой затворения добавки, содержащей УДМК, в приготавливаемый бетон.

Подтверждена возможность замены в высокопрочном бетоне «традиционного» микрокремнезема на ультрадисперсный микрокремнезем с десятикратным уменьшением дозировки (~ 1% от МЦ), при обеспечении равной прочности бетона, твердеющего в нормальных температурных условиях и с кратковременным разогревом до (30...40) °С.

Показана возможность использования УДМК в составе комплексной полифункциональной добавки, с целью использования в литых бетонных смесях, включая высокопрочный бетон.

#### Список источников

1. Ma, J. Ultra High Performance Self Compacting Concrete/ j.Ma, j.Dietz // LACER № 7. 2002.
2. Батяновский, Э.И. Особенности технологии бетона прочностью 100-150 МПа с углеродными наноматериалами / Э.И. Батяновский, В.Д. Якимович, П.В. Рябчиков // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2. – С. 59–67
3. Батяновский, Э.И. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах, включая нанокремнеземные добавки / Э.И. Батяновский, В.Д. Якимович, П.В. Рябчиков // Сборник научных трудов «Проблемы современного бетона и железобетона». Выпуск 3: в 2 т. – Минск, РУП «БелНИИС», 2011 Т. 2. – С.53-68.
4. Holland T.C. Working with Silica Fume in Ready-Mixed Concrete - USA Experience. CANMET/ACI Third International Conference. Trondheim, Norway, 1989, Proceedings, V.2, p.p. 763-781.
5. Radjy F.F., Bogen T., Sellevold E.J., Loeland K.E. A Review of Experiences with Condensed Silica-Fume Concretes and Products. CANMET/ACI Second International Conference. Madrid, Spain, 1986, Proceedings, V.2, p.p.1135-1152.
6. Method of Producing Stabilized aqueous dispersions of Silica Fume. US Patent № 4321243 C04B, 33/141.



7. Method of Compacting Silica Dust. US Patent № 4126424, B01J 2/16.
8. ТУ 5743-02595332-96 “Модификатор бетона марки МБ-01. Технические условия” (НИИЖБ, 1996 г.).
9. Химическая добавка для ускорения твердения цемента. // Патент № 21123ВУ, МКИ С 04 В 22/08, опубл. 10.03.2017
10. Гуриченко, Н.С. Цементный камень с ультрадисперсным микрокремнеземом / Н.С. Гуриченко // Сборник статей по материалам Международной научно – технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения И.Н. Ахвердова и С.С. Атаева «Инновации в бетоноведении, строительном производстве и подготовке инженерных кадров»: в 2 ч. – Минск, БНТУ, 2016 Ч. 1. – С.71 – 76.
11. Гуриченко, Н.С. Конструкционный тяжелый бетон с добавкой ультракремнезема / Н.С. Гуриченко, Э.И. Батыновский // Международная научно-техническая конференция «Инновации в дорожном строительстве.» Сборник докладов – Минск, БелдорНИИ, 2016 – С.105 – 114.
12. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. – М.: Высшая школа, 1973. – 498 с.
13. Бибик, М.С. Оценка кинетики твердения цементного камня с использованием термодатчиков системы «Термохрон» / М.С. Бибик, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2010. –№ 4. – С. 23–26.
14. Гущин, С.В. Экспресс-метод оценки эффективности противоморозных добавок / С.В. Гущин, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2015. –№ 6. – С. 9–18.
15. Тейлор, Х. Химия цемента. Пер. с англ. / Х. Тейлор. – М: Мир, 1996. – 500 с.
16. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.